

Из опыта работы

Адаптируемая математическая модель гидравлических и паровых первичных двигателей генераторов энергосистем¹

БОРОВИКОВ Ю.С., ГУСЕВ А.С., СУЛАЙМАНОВ А.О.

Приведены результаты разработки и исследования адаптируемой математической модели гидравлических и паровых первичных двигателей генераторов энергосистем. Синтезированная модель позволяет достаточно полно и достоверно воспроизводить непрерывный спектр процессов в любом конкретном типе этих двигателей, необходимый для адекватного моделирования нормальных, аварийных и послеаварийных режимов электроэнергетических систем. Адекватность разработанной модели подтверждена экспериментальными исследованиями.

Ключевые слова: энергосистема, первичный двигатель, гидравлическая турбина, паровая турбина, математическая модель, экспериментальные исследования

Первичными двигателями (ПД) подавляющего большинства генераторов современных электроэнергетических систем (ЭЭС) служат различные типы гидравлических и паровых турбин со своими системами регулирования, коммуникациями энергоносителя и вспомогательным оборудованием. В последнем случае, кроме паровой турбины, в состав ПД входит парогенератор с системами регулирования, коммуникациями энергоносителя, вспомогательным оборудованием и трактом топливоподачи. В сравнении с другим основным оборудованием ЭЭС первичные двигатели оказываются одними из наиболее сложных объектов, режимы работы и процессы в которых взаимосвязаны с процессами в другом оборудовании, значительно влияют на них, прежде всего на устойчивость генераторов. В связи с чем актуальной является, в частности, задача надежной и эффективной взаимосвязанной настройки систем автоматического регулирования ПД и автоматических регуляторов возбуждения генераторов.

При решении многих задач проектирования, исследования, развития и эксплуатации электрических станций и ЭЭС в целом важен достаточно полный и достоверный учет процессов, протекаю-

An article considers the results of elaboration and research of adaptive mathematical model of hydraulic and steam primary movers for electrical generators. Synthesized model allows providing adequate and accurate simulation of continuous and indecomposable spectrum of processes for any particular type of primary mover, what is prominent for adequate simulation of normal, fault and post-fault power system processes. An adequateness of the elaborated model is confirmed with experimental investigations of its application in power system real time simulator

Key words: power system, primary mover, hydraulic turbine, steam turbine, mathematical model, experimental investigations, adequateness, generators,

щих в ПД при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах ЭЭС. Между тем применяемые в различных программах расчета режимов и процессов в ЭЭС математические модели ПД весьма упрощенно воспроизводят некий обобщенный ПД и далеко не всегда удовлетворяют указанным требованиям.

Разработка математической модели ПД, позволяющей адекватно моделировать любой конкретный тип двигателя, осложнена тем, что в настоящее время в ЭЭС находится в эксплуатации множество различных типов турбин и котлоагрегатов с разнообразными системами и законами регулирования. И хотя передаточные функции отдельных элементов и звеньев этого оборудования известны, разработка цельной математической модели для конкретного типа оборудования и компоновки ПД оказывается уникальной. Это подтверждается многочисленными исследованиями особенностей и специфики работы парогенераторов с прямоточными и барабанными котлоагрегатами и применяемых систем и законов их регулирования, а также конденсационных турбин, в том числе с промежуточным пароперегревом, турбин с противодавлением, турбин с промышленными и теплофикационными отборами пара, гидротурбин и разнообразных систем регулирования перечисленными турбинами [1–4], которые показывают наличие у них

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука» 7.2826.2011 «Разработка и создание гибридной модели энергоблоков электростанций».

как общих, так и принципиально отличающихся свойств.

Таким образом, математическая модель даже самого сложного ПД не решает задачи в целом, необходима разработка математической модели для каждого существенно отличающегося типа ПД. При этом необходимо учитывать тенденции модернизации двигателей, в том числе возможность значительных изменений. Разработанные сложные математические модели, в которых несмотря на существенные различия есть и общие фрагменты (или сравнительно просто адаптируемые), являются неоптимальными и неудобными для практического использования. Поэтому возникает еще и задача синтеза: создание на основе разработанных для каждого вида и типа ПД математических моделей универсальной модели.

Опуская промежуточные результаты анализа, разработки и синтеза, ниже приводится конечный результат решения поставленной задачи. Наиболее наглядной и исходной формой сложной динамической модели для всех возможных методов, способов и средств расчета является операторная схема, которая не только иллюстрирует математическое содержание модели, но и показывает структуру моделируемых объектов, что позволяет легко ориентироваться в ней и адаптировать ее для конкретных целей. Такая операторная схема разработанной математической модели ПД представлена на рис. 1, где соответствующими передаточными функциями отражены: $K_{3м}$ – загрузка энергоблока, определяющая в регуляторе мощности (РМ) задаваемую энергоблоку мощность $P_{зд}$; $K_{пау}$ – уровень послеаварийной разгрузки (дозагрузки) энергоблока $\pm DP_{пау}$, воздействующей через РМ и электрогидравлический преобразователь (ЭГП); $\frac{P_{\text{Э}}}{P_{\text{Г}}} = \frac{K_{\text{им}}}{1 + T_{\text{им}} p}$

– измеритель мощности синхронного генератора (СГ); $\frac{w_{\text{к}}}{w_{\text{Д}}} = \frac{K_{\text{к}}}{1 + T_{\text{к}} p}$ – частотный корректор мед-

леннодействующего контура (МдК) РМ; $\frac{P_{\text{Дд}}}{P_{\text{Дз}}} = \frac{T_{\text{зд}} p}{1 + T_{\text{зд}} p}$ – звено динамической коррекции

МдК РМ; $K_{\text{Др}}$ – канал коррекции МдК РМ по давлению свежего пара; $\frac{P_{\text{рм}}}{P_{\text{Дс}}} = \frac{K_{\text{рм}}}{1 + T_{\text{рм}} p}$ – общий

канал МдК РМ; $K_{\text{рдс}}$ – общий канал регулирования мощности конденсационных турбин в режимах на скользящем давлении пара и регулирования давления пара перед турбиной «до себя», включая стерегущий режим, а также регулирования мощности турбин с противодавлением, турбин с промыш-

ленными и теплофикационными отборами пара; $K_{\text{ар м}}$ – многофункциональное управление, в том числе для воспроизведения системного АРЧМ;

$K_{\text{мут}}, \frac{P_{\text{мут}}}{P_{\text{Дм}}} = \frac{1}{1 + T_{\text{мут}} p}$ – механизм управления тур-

биной; $K_{\text{п}}, K_{\text{нкн}}$ – канал начальной динамической коррекции неравномерности быстродействующего контура (БдК) РМ, посредством которого через ЭГП формируется корректирующее воздействие $P_{\text{нк}}$ с ограничением согласно уравнению $P_{\text{нк}} = (P_{\text{Э}} - K_{\text{п}} \gamma_{\text{пп}}) K_{\text{нкн}}$, где $P_{\text{Э}}$ – мощность генератора; $\gamma_{\text{пп}}$ – давление пара за промежуточным пароперегревателем; $K_{\text{скн}}$ – статическая коррекция неравномерности БдК РМ; $\frac{P_{\text{дм}}}{P_{\text{Д}}} = \frac{1 + T_{\text{дм}} p}{1 + T_{\text{дм}} p}$ –

звено динамической коррекции БдК РМ; $K_{\text{па}}$ – динамическая коррекция БдК РМ; $\frac{w_{\text{и}}}{w} = \frac{K_{\text{и}}}{1 + T_{\text{и}} p + T_{\text{и}}^2 p^2}$ – измеритель скорости вра-

щения турбины; $\frac{w_{\text{л к}}}{w_{\text{Д}}} = \frac{K_{\text{л к}} p}{1 + T_{\text{л к}} p}$ – динамическая

частотная коррекция БдК РМ; $K_{\text{р}}$ – многофункциональное управление разгрузкой через БдК РМ, в том числе противоаварийной автоматической импульсной разгрузкой (АИР), осуществляемой путем функционального изменения $K_{\text{р}}$, обеспечивающего

формирование $DP_{\text{аир}} = DP_{\text{аир}}^{(0)} e^{-\frac{t}{t_{\text{аир}}}}$, где

$DP_{\text{аир}}^{(0)} = \text{var}$ – часть $DP_{\text{аир}}$, снимаемая по экспоненциальному закону $t_{\text{аир}} = \text{var}; \frac{P_{\text{эгп}}}{P_{\text{Дз}}} = \frac{K_{\text{эгп}}}{1 + T_{\text{эгп}} p}$ – об-

щий канал БдК РМ; $K_{\text{рс}} = \frac{1}{s}$ – регулятор скорости (РС), где $s = \text{var}$ – статизм; K_{w_0} – задание уставки

w_0 РС; $\frac{m_{\text{h}}}{P_{\text{С}}} = \frac{1}{1 + T_{\text{h}} p}$ – промежуточный золотник

регулятора турбины; $\pm K_{\text{рдв}}, \pm K_{\text{рдн}}$ – каналы акцентного управления регулируемыми клапанами (РК) частей высокого (ЧВД) и низкого (ЧНД) давления турбины с промышленными и теплофикационными отборами пара при осуществлении связанного регулирования, обеспечивающего автономность управления частотой вращения турбины и давлением; $K_{\text{hb}}, K_{\text{hn}}$ – коэффициенты передачи каналов акцентного управления РК ЧВД и ЧНД

турбины по частоте вращения; $\frac{m_{\text{зво}}}{m_{\text{зво}}} = \frac{1}{1 + T_{\text{зво}} p}$ –

открытие окон золотника сервомотора РК ЧВД;

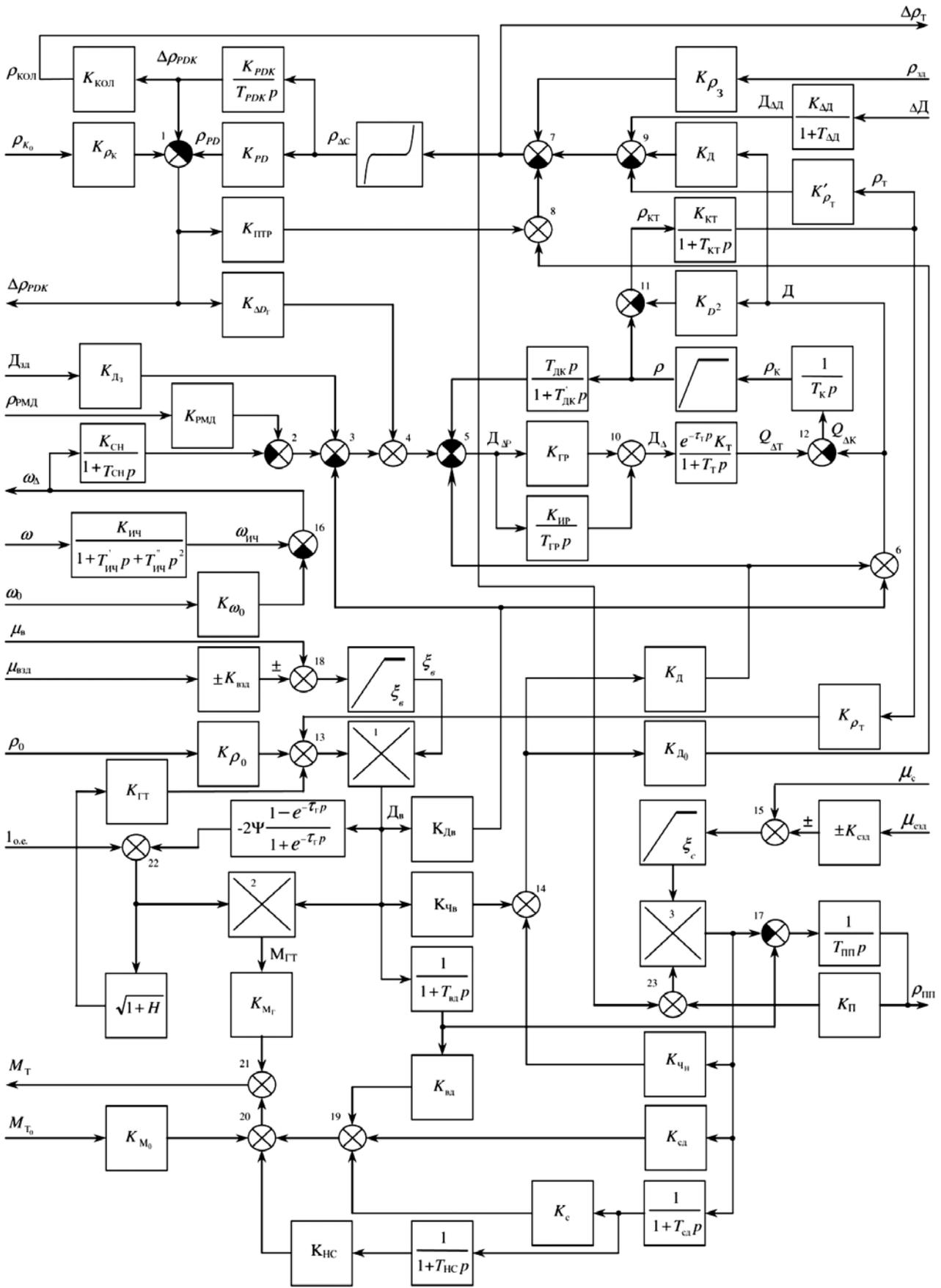


Рис. 1. Функциональная операторная схема математической модели первичных двигателей

$\frac{m_{\text{во}}}{m_{\text{зво}}} = \frac{1}{T_{\text{во}} p}$ – перемещение поршня сервомотора

РК ЧВД на открытие; $\frac{m_{\text{звз}}}{m_{\text{звз}}} = \frac{1}{1+T_{\text{звз}} p}$ – закрытие

окон золотника сервомотора РК ЧВД; $\frac{m_{\text{вз}}}{m_{\text{звз}}} = \frac{1}{T_{\text{вз}} p}$

– перемещение поршня сервомотора РК ЧВД на

закрытие; $\frac{m_{\text{зсо}}}{m_{\text{зсо}}} = \frac{1}{1+T_{\text{зсо}} p}$ – открытие окон золот-

ника сервомотора РК части среднего (ЧСД) или

низкого (ЧНД) давления, или их обобщения, кото-

рое обычно также обозначают ЧНД; $\frac{m_{\text{со}}}{m_{\text{зсо}}} = \frac{1}{T_{\text{со}} p}$ –

перемещение поршня сервомотора РК ЧСД, ЧНД

на открытие; $\frac{m_{\text{зсз}}}{m_{\text{зсз}}} = \frac{1}{1+T_{\text{зсз}} p}$ – закрытие окон зо-

лотника сервомотора РК ЧСД, ЧНД; $\frac{m_{\text{сз}}}{m_{\text{зсз}}} = \frac{1}{T_{\text{сз}} p}$ –

перемещение поршня сервомотора РК ЧСД, ЧНД

на закрытие; $K_{\text{ожв}}, K_{\text{ожс}}$ – коэффициенты жесткой

отрицательной обратной связи систем управления

РК ЧВД и ЧСД, ЧНД соответственно;

$\frac{m_{\text{из}}}{m_{\text{в}}} = \frac{T_{\text{из}} p}{1+T_{\text{из}} p}$ – гибкая отрицательная обратная

связь системы управления задвижкой направляю-

щего аппарата гидротурбины, функции которой в

этом случае возлагаются на систему управления РК

ЧВД с соответствующими изменениями парамет-

ров передаточных функций, а аналогичная система

ЧСД, ЧНД при этом не используется; $x_{\text{в}}$ – степень

открытия РК ЧВД паровой турбины или задвижки

направляющего аппарата гидротурбины; $\pm K_{\text{взд}}$ –

многофункциональное задание предварительного

положения РК ЧВД, задвижки направляющего ап-

парата или различного рода возмущающих воздей-

ствия жидкости через задвижку, где $H_{\text{в}}$ – относи-

тельное превышение напора воды перед задвижкой

направляющего аппарата, определяемое с учетом

явления гидроудара (ГУ) передаточной функцией

$\frac{H_{\text{в}}}{D_{\text{в}}} = -2Y \frac{1-e^{-t_{\text{г}} p}}{1+e^{-t_{\text{г}} p}}$, где $Y = \frac{aV}{2H_{\text{г}}}$ – ударная харак-

теристика водовода; a – скорость распространения

волны ГУ; V – скорость потока воды; $H_{\text{г}}$ – номи-

нальный напор воды; $t_{\text{г}} = \frac{2L}{a}$ – фаза ГУ для трубо-

провода длиной L ; $\frac{D_{\text{вд}}}{D_{\text{в}}} = \frac{1}{1+T_{\text{вд}} p}$ – паровой объем

ЧВД, где $D_{\text{вд}}$ – расход пара через этот объем; $K_{\text{вд}}$

– доля мощности и соответственно момента турби-

ны ($M_{\text{т}}$) за счет ЧВД; $K_{\text{сд}}$ – часть доли мощно-

сти и, соответственно, $M_{\text{т}}$ за счет ЧСД; $\frac{D_{\text{сд}}}{D_{\text{с}}} = \frac{1}{1+T_{\text{сд}} p}$

– эквивалентный паровой объем ЧСД, распо-

ложенный за контуром промперегрева, где $D_{\text{сд}}$ –

расход пара через этот паровой объем; $D_{\text{с}}$ – расход

пара через ЧСД, равный произведению $x_{\text{с}}$ на соот-

ветствующее давление пара согласно функциональ-

ной схеме; $K_{\text{с}}$ – доля мощности и, соответственно,

$M_{\text{т}}$ за счет ступеней ЧСД, расположенных за ука-

занным выше эквивалентным паровым объемом;

$\frac{D_{\text{нс}}}{D_{\text{сд}}} = \frac{1}{1+T_{\text{нс}} p}$ – эквивалентный паровой объем,

расположенный за РК ЧНД, где $D_{\text{нс}}$ – расход пара

через ЧНД; $K_{\text{нс}}$ – доля мощности и, соответствен-

но, $M_{\text{т}}$ за счет ЧНД; $K_{\text{мг}}$ – многоцелевое управле-

ние, в частности для моделирования различного

рода возмущений, а также «обнуления» момента

гидротурбины $M_{\text{г}} = K_{\text{мг}} D_{\text{в}} (1+H_{\text{в}})$, при моделиро-

вании паровой турбины; $K_{\text{м0}}$ – воспроизведение

разнообразных аддитивных возмущений $M_{\text{г}}$; $K_{\text{гт}}$,

$K_{\text{гт0}}$, $K_{\text{н}}$, $K_{\text{в}}$, $K_{\text{кол}}$, $K_{\text{д0}}$, $K_{\text{д}}$, $K_{\text{дв}}$, $K_{\text{пп}}$ –

многофункциональные коэффициенты, позволяю-

щие, в частности, задавать тип и режим работы мо-

делируемого ПД: $\frac{r_{\text{к}}}{Q_{\text{Дк}}} = \frac{1}{T_{\text{к}} p}$ – парогенератор (кот-

лоагрегат (КА)), где $Q_{\text{Дк}}$ – количество тепла, необ-

ходимое для производства расходуемого количества

пара $D_{\text{Д}}$ с давлением $r_{\text{к}}$; $\frac{Q_{\text{Дт}}}{D_{\text{Д}}} = e^{-t_{\text{т}} p} \frac{K_{\text{т}}}{1+T_{\text{т}} p}$ –

тракт топливоподачи, где $\frac{L_{\text{т}}}{D_{\text{Д}}} = e^{-t_{\text{т}} p}$;

$\frac{Q_{\text{Дг}}}{L_{\text{т}}} = \frac{K_{\text{т}}}{1+T_{\text{т}} p}$ – топка; $\frac{r_{\text{дк}}}{r} = \frac{T_{\text{дк}} p}{1+T_{\text{дк}} p}$ – динамиче-

ская коррекция контура регулирования производи-

мого КА тепла по давлению; $K_{\text{гр}}$ – пропорцио-

нальная часть пропорционально-интегрального

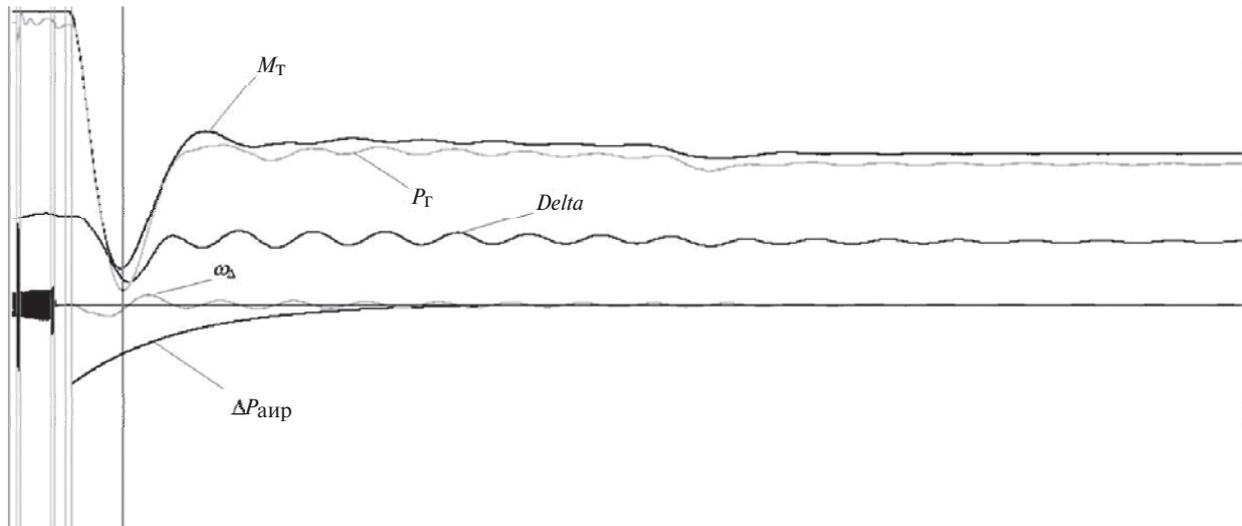


Рис. 2. Процесс противоаварийной разгрузки энергоблока 800 МВт: M_T – момент турбины; $P_Г$ – активная мощность генератора; Δ – взаимный угол генератора

(ПИ) регулятора топлива (главного регулятора)

$$KA; \frac{D_{Ди}}{D_{Др}} = \frac{K_{ир}}{T_{гр}p} - \text{интегральная часть ПИ-регулятора топлива KA;}$$

$$\frac{D_{сн}}{w_D} = \frac{K_{сн}}{1 + T_{сн}p} - \text{коррекция про-$$

изводительности КА из-за изменения режима работы оборудования собственных нужд, обусловленного отклонениями частоты w_D ; $K_{дз}$ – задание паропроизводительности $D_{зд}$ КА и ее изменения $D_{Дз}$; $K_{рмд}$ – канал РМ управления производительностью КА; K_{D^2} – перепад давления пара перед турбиной, определяемый уравнением $Dg_T = K_{D^2} D^2$,

по сравнению с давлением на выходе КА r_K , где D – расход пара через турбину; $\frac{r_T}{r_{KT}} = \frac{K_{KT}}{1 + T_{KT}p}$ – па-

ропровод между КА и турбиной; K_{rT} – обобщенный измеритель давления пара перед турбиной; $K_{rз}$ – задание давления пара перед турбиной; $K_{ди}$ – обобщенный измеритель расхода пара через турбину; $\frac{D_{Дд}}{D_{Дп}} = \frac{K_{Дд}}{1 + T_{Дд}p}$ – изменение потребления

пара из коллектора вследствие каких-либо возмущений у потребителя $D_{Дп}$; $K_{птр}$ – взаимосвязь между изменением давления в коллекторе Dg_{PDK} и отклонением расхода пара D ; K_{rK} – задание уставки давления в коллекторе r_{K0} ; K_{DDr} – общий канал главного ПИ-регулятора КА; K_{PD} – пропорциональная часть ПИ-регулятора давления КА; $\frac{r_{PD}}{r_{DC}} = \frac{K_{PDK}}{T_{PDK}p}$ – интегральная часть ПИ-регулятора давления КА.

Синтезированная модель учитывает практически все основные процессы в первичных двигателях,

в результате значительно повышается, в частности, точность моделирования динамического баланса генерируемой и потребляемой мощности в ЭЭС, а следовательно, процессов изменения частоты и перераспределения генерации между энергоблоками и электростанциями с учетом их колебательной устойчивости. Значительно точнее воспроизводятся динамические переходы, связанные с противоаварийной разгрузкой энергоблоков, что позволяет более достоверно оценивать устойчивость ЭЭС и оптимально настраивать средства противоаварийной автоматики. Фрагмент экспериментальных исследований противоаварийного управления мощностью парового ПД энергоблока 800 МВт приведен на рис. 2

Адекватность рассмотренной математической модели подтверждена результатами ее использования в составе всережимного моделирующего комплекса реального времени интеллектуальных энергосистем (ВМК РВ ИЭС) [5].

Выводы. 1. Разработанная математическая модель первичных двигателей синхронных генераторов позволяет адаптировать ее для моделирования всех указанных видов и типов используемых первичных двигателей с учетом их систем и законов регулирования.

2. В полученной математической модели первичных двигателей учтены все значимые элементы оборудования, что служит объективной гарантией повышения уровня адекватности моделирования.

3. Основные результаты разработки подтверждены практикой их использования при эксплуатации ВМК РВ ИЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.А. Регулирование энергоблоков. – Л.: Машиностроение, 1982.

2. Лукашов Э.С., Каложный А.Х., Лизалек Н.Н. Длительные переходные процессы в энергетических системах. – Новосибирск: Наука, 1985.

3. Бушуев В.В. Динамические свойства электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1987.

4. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990.

5. Боровиков Ю.С. Концепция адекватного моделирования интеллектуальных энергосистем. – Изв. вузов. Электромеханика, 2011, № 6.

[22.10.12]

А в т о р ы : **Боровиков Юрий Сергеевич** окончил факультет автоматики и электромеханики Томского политехнического университета (ТПУ) в 2000 г. В 2003 г. защитил кандидатскую диссертацию «Программно-аппаратные средства для оценки коммута-

ционной напряженности коллекторных электрических машин» в ТПУ. Заведующий кафедрой «Электроэнергетические системы» Энергетического института ТПУ.

Гусев Александр Сергеевич окончил электроэнергетический факультет Томского политехнического института (ТПИ) в 1973 г. В 2008 г. защитил докторскую диссертацию «Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем» в ТПУ. Профессор кафедры «Электроэнергетические системы» ТПУ.

Сулайманов Алмаз Омурзакович окончил ЭЭФ ТПИ в 1991 г. В 2009 г. защитил кандидатскую диссертацию «Неактивная мощность и ее составляющие в электроэнергетических системах» в ТПУ. Доцент кафедры «Электроэнергетические системы» ТПУ.

* * *

ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении (стоимость по договоренности).

При повторении той же рекламы в следующем номере – скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах – скидка 20%. Стоимость оплаты рекламных статей – по договоренности. Последний срок представления рекламного материала – за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648

тел./факс: (7-495)362-7485

E-mail: l.s.kudinova@rambler.ru

Зарубежная подписка

на журнал «Электричество»
оформляется через фирмы-партнеры ЗАО «МК-Периодика» или непосредственно
в ЗАО «МК-Периодика» по адресу:

Россия, 111524 Москва, Электродная ул., 10, стр. 3

ЗАО «МК-Периодика»;

тел. (495) 672-70-12; факс (495) 306-37-57

E-mail: info@periodicals.ru

Internet: <http://www.periodicals.ru>